



Implementierung extremer Wetterereignisse in Schnellzeitsimulationsmodellen

Masterarbeit im Studiengang „Meteorologie“

Leibniz Universität Hannover

Manuela Sauer



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Gliederung

- Motivation
- Zielsetzung und Aufbau
- Konzeption
 - Wettereinfluss im Flugverkehr
 - Winterwetter
 - Schnellzeitsimulationsmodelle
- Implementierung
 - Simmod *PLUS!*
- Demonstration
 - Repräsentative Flughäfen
 - Mögliche Szenarien
- Ausblick

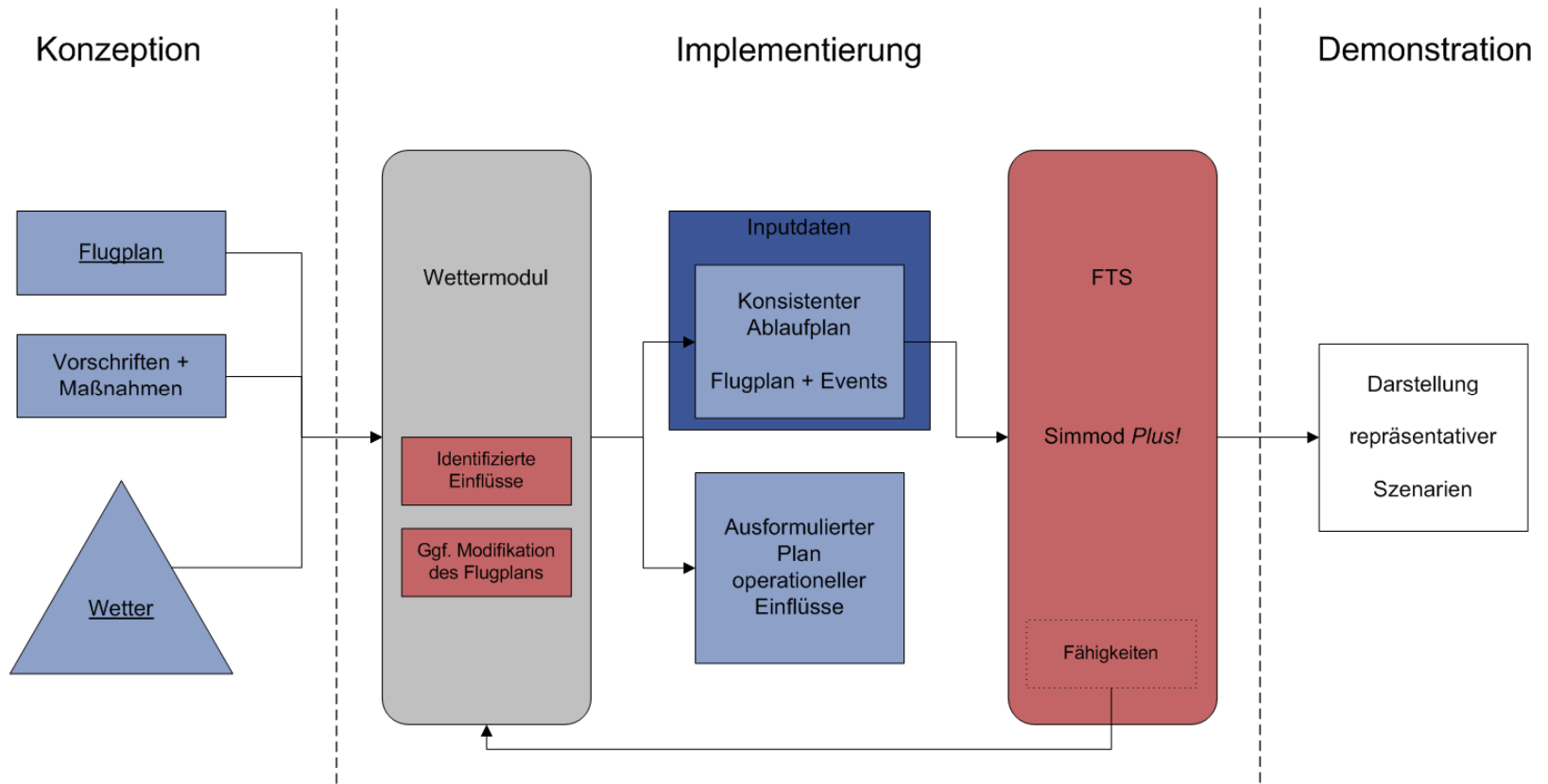
Motivation

- Große Bedeutung des Luftverkehrs
 - Mobilität der Menschen
 - Globaler Handel
- Wetter beeinflusst Flugverkehr hinsichtlich
 - Sicherheit
 - Effizienz, d.h. Wirtschaftlichkeit und Pünktlichkeit
- Wetterereignisse
 - Wintersaison 2009/2010 und Weihnachten 2010
 - Kyrill Januar 2007
 - Eyjafjallajökull April 2010

Stand der Forschung

- Vorangegangene Studien zum Thema „Wetter im Luftverkehr“
 - Spehr (2003): *Analyse des Wettereinflusses auf die Pünktlichkeit im Flugverkehr*
 - Röhner (2004): *Meteorologische Analyse des Wettereinflusses auf den Flugbetrieb im Winter*
- Studien zum Thema „Wetter in Luftverkehrsmodellen“
 - Himmelsbach: *Erste Studien zur Modellierung des Wetters in einem Luftverkehrsmodell*
(2009)
 - Roloff (2010): *Winterwetter im Luftverkehrsmodell*

Zielsetzung und Aufbau



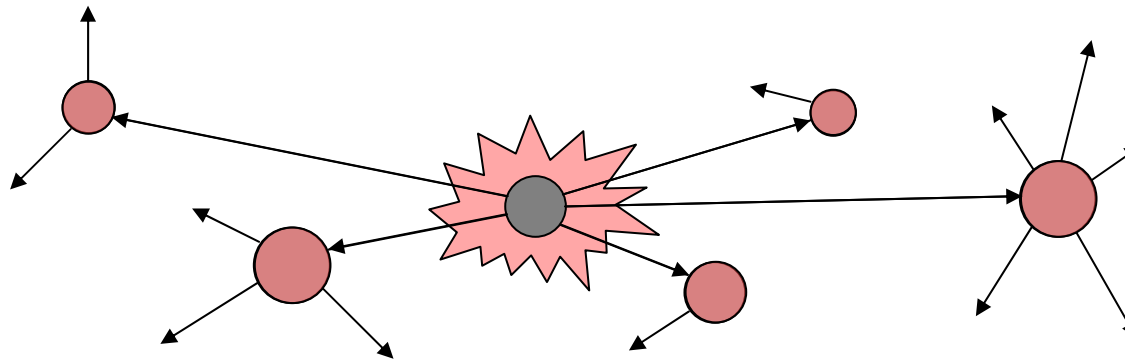
Konzeption – Wettereinfluss im Flugverkehr

- Relevante Phänomene in Flughafennähe
 - Winterwetter
 - Wind
 - Sichtbedingungen
 - Gewitter
 - Regen/Nässe

- Auswirkungen abhängig von
 - Intensität und Dauer des Phänomens
 - Zeit des Auftretens
 - Vorgehaltener Infrastruktur

Konzeption – Wettereinfluss: Ausbreitung von Störungen

- Zeitliche Ausbreitung
 - Lineare Störung bei freien Kapazitäten
 - Nicht-lineare Ausbreitung bei Kapazitätsauslastung
- Räumliche Ausbreitung
 - Lokale Störung an einem Flughafen
 - Ausbreitung ins weltweite Netz → Netzstörung



Konzeption – Winterwetter

➤ Zahlreiche Einflussfaktoren

- Bodenbetrieb: Flächenenteisung
Flugzeugenteisung
- Luftseite: Sichtbehinderungen → Staffelungsvariation

➤ Handlungskategorie I „Standardschneefall“

- Temperatur $0^{\circ}\text{C} < T < 5^{\circ}\text{C}$
- Schneehöhe $2\text{cm} < h < 5\text{cm}$
- Windgeschwindigkeit $< 8 \text{ kt}$
- keine weiteren (gefrierenden) Niederschläge

➤ Enteisung auch bei Temperatur $> 0^{\circ}\text{C}$ notwendig

Konzeption – Winterwetter: Flächenenteisung

WD-Ablaufplan nach „Standard“-Schneefall

Einsatz-Gruppe	Reinigungs-qualität	Fläche	vorrangige Priorität	Pause	nachrangige Priorität
			0 1 2 3 4 5 6 7 8 Std.		
Start- und Landebahnen	1	S/L-Bahn Süd Sperrzeit 1,5 h	=====	}	In Abhängigkeit von der Verkehrslage
IFM-FA3	1	S/L-Bahn Nord Sperrzeit 1,0 h	=====		
	1	Startbahn West Sperrzeit 1,0 h	=====		
	1	Rollbahnen Sperrzeit 1,5 h C, S, W	=====		
Rollbahnen	2	Rollbahnen von und zur Südbahn	=====		
und Vorfeld	2	Rollbahnen von und zur Nordbahn	=====		
IFM-FA 3	2	Terminalhöfe, Frachtrollbahnen	=====		
Bremswertmessung	2		=====		
Roll-Leitlinien	1	Rollbahnen	=====		
Positionen	1	Einzelpositionen	=====		
Fluggastbrücken		Brücken, Flugbetriebsflächen	=====		
BVD-Flächen	1	Abstellflächen BVD	=====		
BVD-Flächen	1	Abstellflächen Sonstige	=====		
Vorfeld-Straßen	3	DFS-Sendeanlagen	=====		
Schneeabfuhr	2	Vorfeldstraßen	=====		
IFM-FA3	2	Sonstige Vorfelder	=====		

➤ Modifikation des Flugplans

Streichung/
Umleitung einzelner Flüge

Erläuterungen :
Einsatzzeit: 

Quelle: FRAPORT AG (2009)



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Konzeption – Winterwetter: Flugzeugenteisung



Quelle: N*ICE (2010)

- 2 Deicing Pads, Remote Position + Vorfeldpositionen (Je nach Bahnkonfiguration)
- Warteschlangen
- Behandlungsdauer
- Vorhaltezeit



Konzeption – Winterwetter: Sichtbedingungen

➤ Staffelungsvorgaben

- VMC Sichtflugbedingungen
- IMC Instrumentenflugbedingungen

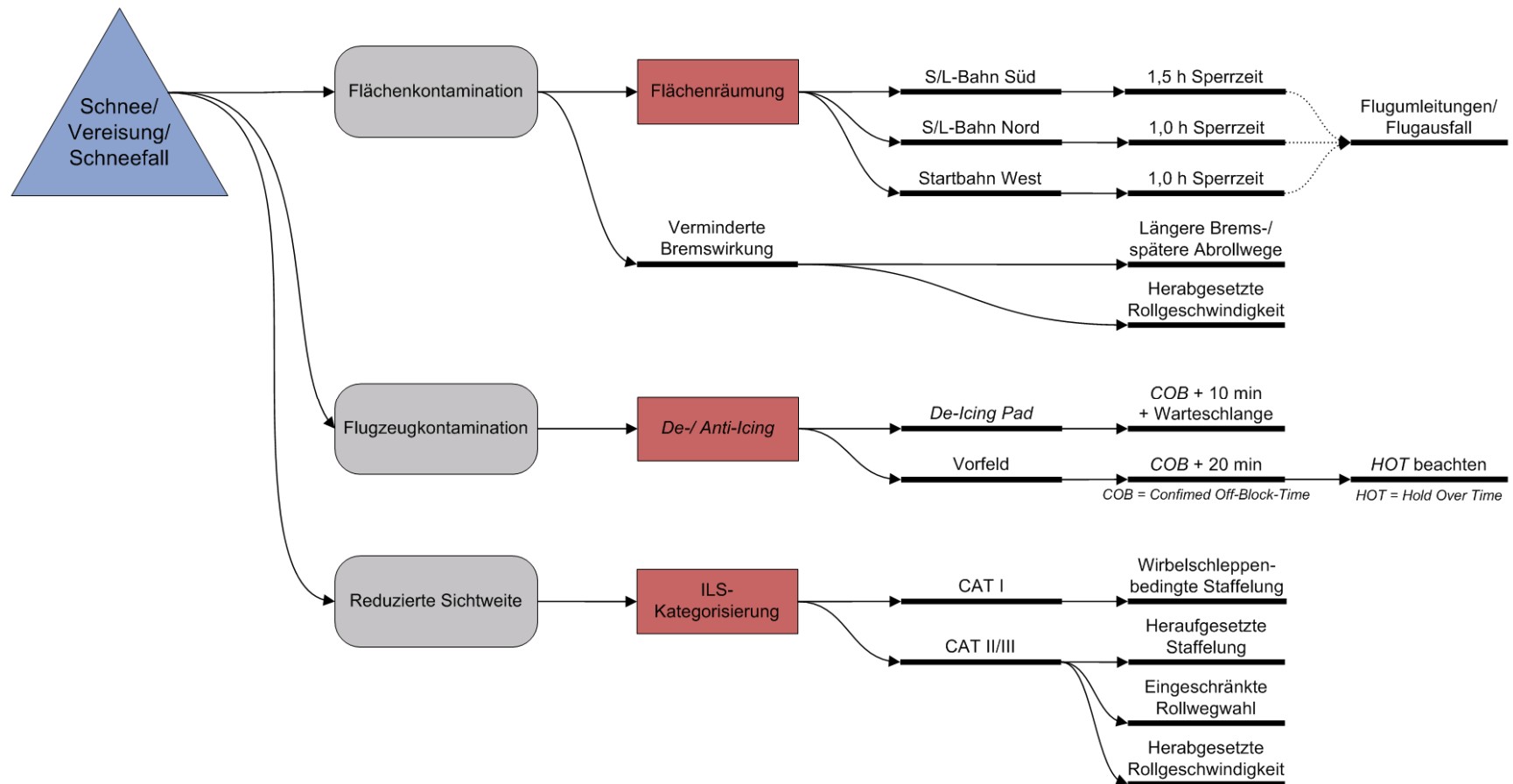
Betriebsstufen durch DFS

ILS-Kategorie	RVR	Ceiling
CAT I	≤ 1000 m	≤ 300 ft
CAT II	≤ 600 m	< 200 ft
CAT III	< 325 m bzw. < 350 m	bis 0 ft

Quelle: DFS (2007)

➤ Bedarf an Staffelungsdaten für CAT-Bedingungen von DFS

Konzeption – Winterwetter: Identifikation kausaler Zusammenhänge



Konzeption – METAR / SPECI

➤ Meteorological Aviation Routine Weather Report

METAR 0550 EDDF 01006KT 3500 SN SCT008 OVC010 M03/M04 Q1010 A2982 0997 2944
TEMPO BKN008 R07R/520278 R07L/520279
COMMENTS: Wind 18: 02007G08KT/000V040 TG: -3.6 R18/550279

- Wind [°,kt]
- Bodensicht [m]
- Signifikantes Wetter (Niederschlag, Gewitter, Nebel, Vulkanasche)
- Bewölkung (FEW, SCT, BKN, OVC)
- Temperatur/Taupunkt
- Pistenzustand: 2mm nasser Schnee auf 11-25% aller Flächen
Reibungskoeffizient → Bremswirkung gut

R/SNOCLO



Konzeption – sonstige relevante Wettermeldungen

- **TAF** (Terminal **A**erodrome **F**orecast)
 - max. 30 Stunden Gültigkeit
- **SNOWTAM** (Sonderform der NOTAMs)
 - Info über Räumung oder Gefährdung von/durch Schnee, Eis etc. auf Bewegungsflächen
- **GAMET** (**G**eneral **A**viation **M**eteorological Information)
 - Flugwettervorhersage für Flugniveaus < FL100
 - 4 Ausgaben täglich für je 6 Stunden
- **SIGMET** (**S**ignificant **M**eteorological Phenomena)
 - Wetterwarnsystem

Konzeption – Schnellzeitsimulationsmodelle

- Simulieren den Flugverkehr aus Lotsen- oder Pilotensicht
- Optimale Gestaltung von Luftraum-/Flughafenstrukturen
- Abbildung realer Strukturen und beliebiger Szenarien
 - Schnelle, effiziente Umsetzung
 - Praxisnahe Kosten-Nutzen-Analysen
- Ausgabeparameter:
 - Trajektorien
 - Verspätungen
 - Treibstoffverbrauch/Emissionen
 - ...

Konzeption – AirTOP

- Fortschrittliches FTS aus Lotsensicht
- Basierend auf Flugplan und Regeln
- Komplexes Performancemodell mit umfangreichen Möglichkeiten

Edit [WINDAREA#1]

General Wind Vector3D Matrix Wind With Noise Vector3D Matrix (Opt)

Matrix sizes

FromLon 0 FromLat 40 FromAlt 0

LonWidth 20 LatHeight 20 AltDepth 3000

LatLonStep 1

Create/Reset matrix

0m-500m	500m-1000m	1000m-1500m	1500m-2000m	2000m-2500m	2500m-3000m															
0°-1	1°-2	2°-3	3°-4	4°-5	5°-6	6°-7	7°-8	8°-9	9°-10	10°-11	11°-12	12°-13	13°-14	14°-15	15°-16	16°-17	17°-18	18°-19	19°-20	20°-21
40°-41°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
41°-42°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
42°-43°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
43°-44°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
44°-45°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
45°-46°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
46°-47°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
47°-48°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
48°-49°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
49°-50°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
50°-51°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
51°-52°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
52°-53°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
53°-54°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
54°-55°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
55°-56°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
56°-57°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
57°-58°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
58°-59°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
59°-60°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt
60°-61°	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt	0° Dkt

Ok (Ctrl+Enter) Cancel (Esc)

Konzeption – AirTOP

- Fortschrittliches FTS aus Lotsensicht
- Basierend auf Flugplan und Regeln
- Komplexes Performancemodell mit umfangreichen Möglichkeiten
- **Hohes Risikopotenzial für den Ausgang der Arbeit:**
 - Aufwendige Einarbeitung
 - Wenig Erfahrung in Abteilung
 - Kaum vollständige Verkehrssimulationen vorhanden
 - Kein kompakter Ablaufplan als Input
- Einbindung nach Abschluss der Arbeit anzustreben

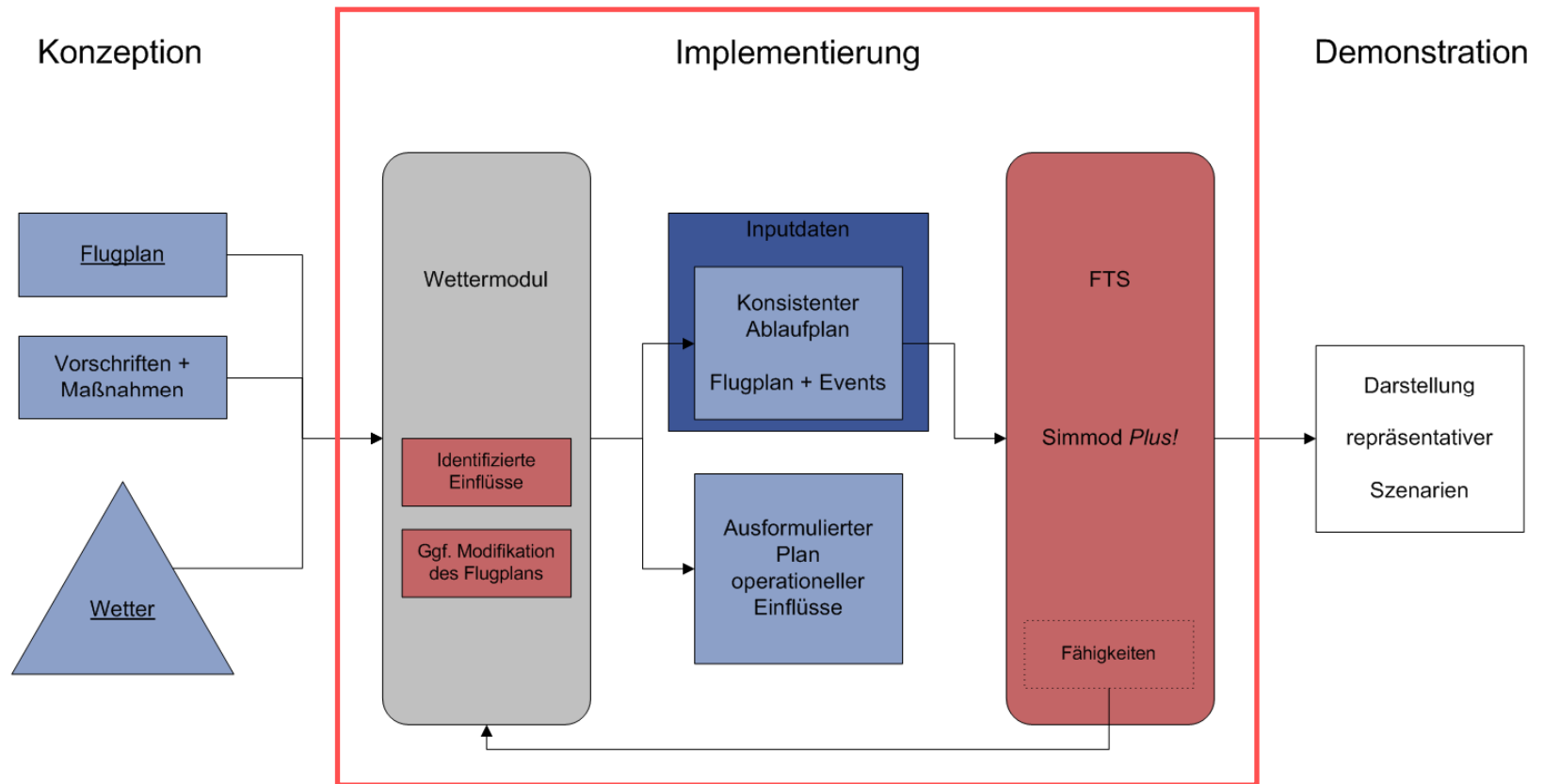
Konzeption – Simmod *PLUS!*

- Stochastisches FTS
 - Kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Rolldistanzen etc.
 - Steuerung über Flugzeugklassen
 - Basiert auf diskreten Events, chronologischer Ablauf
 - Flugplan
 - Externe Ereignisse
- Darstellung über Serien von Knotenpunkten und verbindende Links
- Simmod *PRO!*: zusätzliche Möglichkeiten
z.B. Enteisungsfahrzeuge simulierbar
Anpassung des Ablauf-/Flugplans notwendig

Konzeption – Simmod *PLUS!* Animator



Implementierung



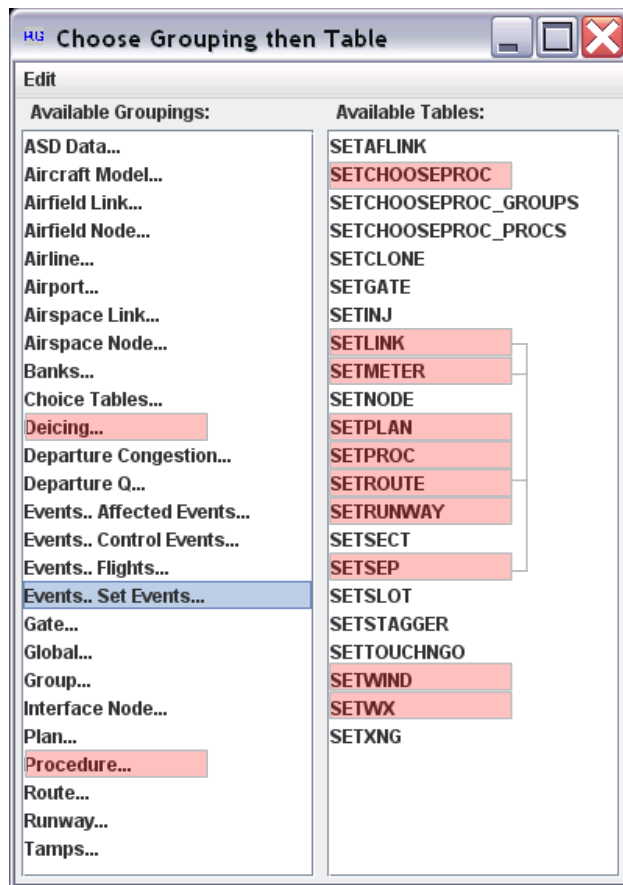
Implementierung – Wetterereignisse im Modell

- Identifikation relevanter, mittlerer Auswirkungen einzelner Wetterereignisse
- Automatisierte Bestimmung zu berücksichtigender Auswirkungen von Wetterereignissen einzelner Tage durch „Wetterschaltmodelle“
 - METAR Meldungen
 - Wettervorhersage

Ausgabe konkreter Werte, die in FTS implementiert werden müssen

- Umsetzung im Modell

Implementierung – Simmod *Plus!*



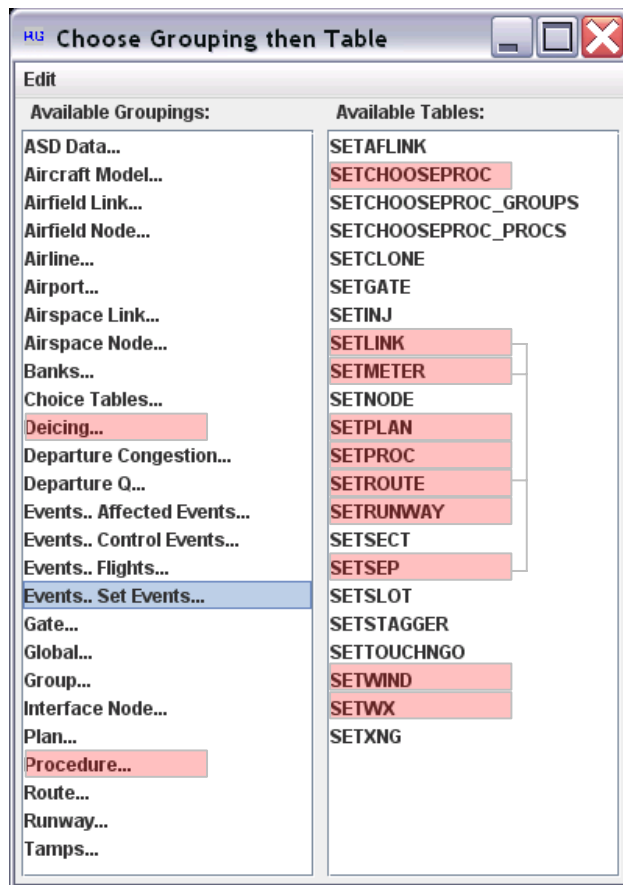
➤ Deicing

- Kapazität
- Behandlungszeit
- Warteschlange
- Vorhaltezeiten

➤ Prozeduren

- Bahnbelegungszeiten
- ARR/DEP Abfolgen

Implementierung – Simmod *Plus!*



- Wahrscheinlichkeiten für Prozeduren
- (Wirbelschleppen-) Separationen
- Nutzbare Runways
- Prozeduren (de-)aktivieren
- Kumulative Verteilungen für Rollwege/-strecken
- Windcharakteristiken
- Wetterparameter RVR & Wolkenuntergrenze

Implementierung – Simmod *Plus!* Inputfile

➤ Ablaufplan im Ascii-Format

SIMU09 - Editor

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?

```

SETPLAN 0.000000 0.000000 1 0 3 HAJ 27L HAJ 27C HAJ 27R *
TRACE 0.000000 0 ; 20 1 *
SETWIND 0.000000 270 10 1 *
SETWIND 0.000000 270 20 2 *
SETWIND 0.000000 270 5 3 *
TRACE 1.000000 0 ; 0 1 *
TRACE 1.500000 0 ; 0 1 *
TRACE 2.000000 0 ; 0 1 *
EMPLANE 2.080000 TUIfly 174 97 HAJ 2 ? ; ? HAJ_C20 HAJ 0 -2 *
TRACE 2.500000 0 ; 0 1 *
EMPLANE 2.670000 TUIfly 6126 97 HAJ 2 ? ; ? HAJ_C19 HAJ 0 -2 *
TRACE 3.000000 0 ; 0 1 *
TRACE 3.500000 0 ; 0 1 *
EMPLANE 3.500000 TUIfly 2146 97 HAJ 2 ? ; ? HAJ_C16 HAJ 0 -2 *

EMPLANE 6.500000 Swiss 819 97 HAJ 2 ? ; ? HAJ_A03 HAJ 0 -2 *
EMPLANE 6.830000 AirFrance 5489 97 HAJ 2 ? ; ? HAJ_A01 HAJ 0 -2 *
TRACE 7.000000 0 ; 0 1 *
SETWX 7.000000 HAJ 120 1000 *
ARRIVAL 7.170000 TUIfly 6610 97 HAJ 8 ? ; ? HAJ_V45 HAJ 0 0.0 *
TRACE 7.500000 0 ; 0 1 *

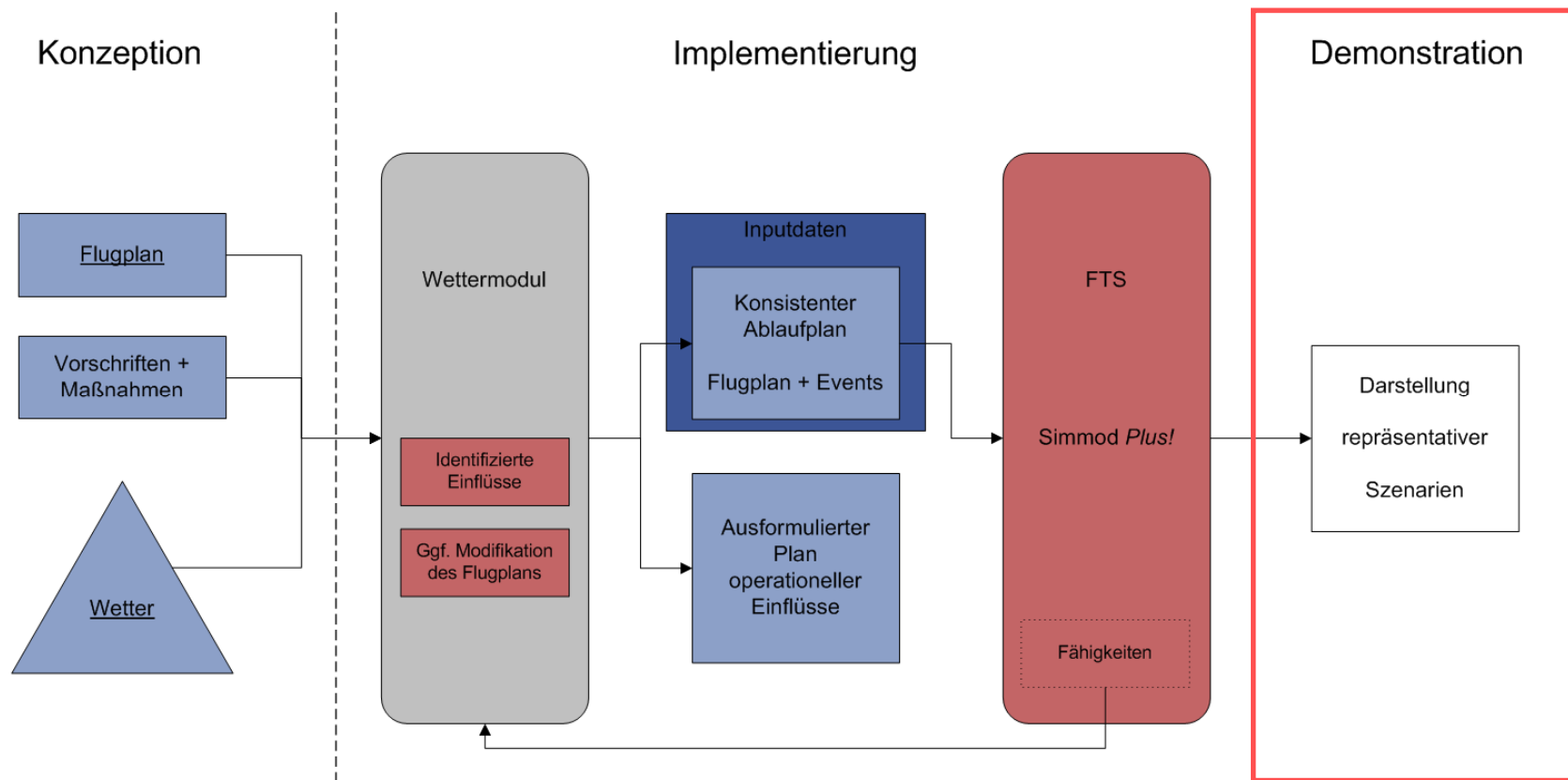
ARRIVAL 9.830000 AirBerlin 3375 97 HAJ 8 ? ; ? HAJ_V22 HAJ 0 0.0 *
TRACE 10.000000 0 ; 0 1 *
SETWX 10.000000 HAJ 150 1500 *
ARRIVAL 10.330000 AirBerlin 2633 97 HAJ 8 ? ; ? HAJ_V23 HAJ 0 0.0 *
  
```

SETWIND Time Dir Speed WSetLst

SETWX Time Apt Ceil Rvr

	HVY	LRG	SML	GA
Min_Ceil	0	100	200	1000
Min_Rvr	700	1200	1800	2500

Demonstration

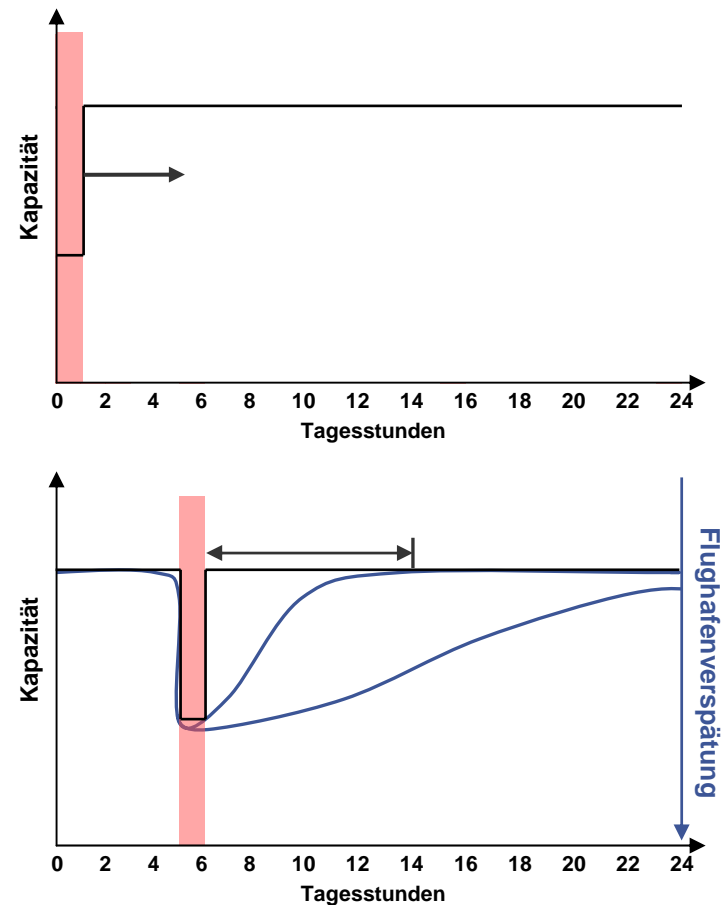


Demonstration – Repräsentative Flughäfen

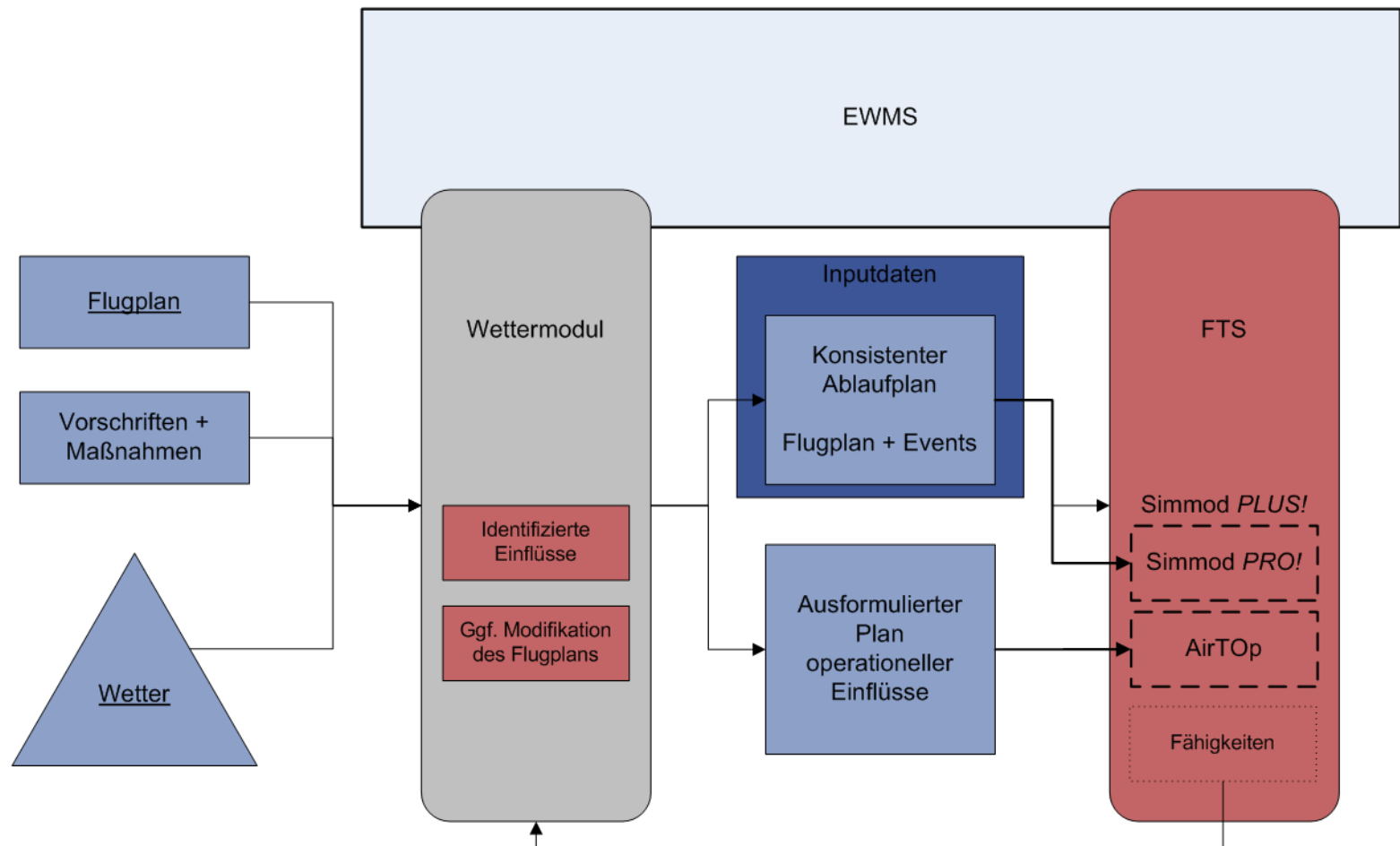
- Frankfurt
 - Standortspezifische Vorschriften/ Abläufe z.T. bereits bekannt
 - Wetterdaten vorhanden
 - Verfügbare Verkehrssimulation
- Ggf. Hannover
- **Validierung des Moduls nicht im Rahmen der Arbeit vorgesehen**
 - Schwierigkeit der Beschaffung realer Vergleichsdaten

Demonstration – Mögliche Szenarien

- Einstündige Störung simulieren
 - Tagesgang des Einflusses (Gesamtverspätungsminuten)
- Regeneration (Möglichkeit, Dauer)



Ausblick



A photograph of an astronaut in a white spacesuit floating in the blue void of space, with a white satellite or spacecraft component visible in the upper right corner.

**Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit!**

Fragen und Anregungen?



Literatur

AIP (2010): *Aerodrome Chart ICAO Frankfurt Main*

ATAC (2010): *Simmod Plus! Reference Manual, Version 7.6*

Beckmann, M. (2011): *Persönliche Mitteilung durch Emailkontakt am 31.01.2011*

DFS (2007): *Betriebsanweisung Flugverkehrskontrolle, Deutsche Flugsicherung*

DWD (2008): *METAR/TAF Wetterschlüssel für die Luftfahrt, Deutscher Wetterdienst, Offenbach*

FRAPORT AG (2009): *Winterdienst-Fachhandbuch der Fraport AG, Wintersaison 09/10, Fraport AG, Frankfurt Airport Services Worldwide*

N*ICE (2010): *N*ICE Services am Standort Frankfurt, Übersichtskarte,*
http://www.nice-services.aero/fileadmin/user_upload/temp/NICE_map.pdf,
Zugriff am 31.01.2011

Röhner, P. (2004): *Meteorologische Analyse des Wettereinflusses auf den Flugbetrieb im Winter*

Roloff, K. (2010): *Winterwetter in einem Luftverkehrsmodell*